文章编号:1000-7601(2019)02-0018-07 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.02.03

生长年限对苜蓿和柠条光合特征及土壤水分的影响

姚毓菲[1,4],邵明安[1,2],贾玉华[3],李同川[2]

(1.中国科学院水利部水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2.中国科学院地理科学与资源研究所,生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101;
3.沈阳农业大学水利学院,辽宁 沈阳 110866;4.中国科学院大学,北京 100049)

摘　要:为了探究生长年限对衰败期苜蓿和中老龄柠条的叶片光合生理特征及土壤水分的影响,在 2014 年于地处黄土高原水蚀风蚀交错带强烈侵蚀中心的神木六道沟小流域,测定了不同生长年限苜蓿(ALF_{10}、ALF_{13}、ALF_{33}和 ALF_{49})和柠条(KOP_{10}、KOP_{25}、KOP_{43}和 KOP_{73})的叶片光合参数、叶结构性状参数以及 0~400 cm 土层土壤体积含水量(SWC_{0-400})。结果表明:对于衰败期苜蓿,ALF_{10}和 ALF_{13}叶片净光合速率(P_n)差异不显著($P>0.05$),而后随生长年限的延长逐渐降低,ALF_{33}和 ALF_{49}比 ALF_{13}叶片的 P_n(24.01 μmol·m^{-2}·s^{-1})分别降低了 2.32 μmol·m^{-2}·s^{-1}和 7.76 μmol·m^{-2}·s^{-1}。相比 ALF_{10},随生长年限延长 SWC_{0-400}恢复至 10.88%(ALF_{13}),而后随着生长年限延长降低至 8.81%(ALF_{33})和 6.12%(ALF_{49})。土壤水分对 ALF_{33}的限制作用不明显,水分胁迫使 ALF_{49}非气孔限制值比 ALF_{33}增大了 0.340。对于中老龄期柠条,叶片 P_n随生长年限的延长先升高后降低,KOP_{25}和 KOP_{43}叶片 P_n最大且两者差异不显著($P>0.05$),比 KOP_{10}(6.62 μmol·m^{-2}·s^{-1})分别增大了 6.57 μmol·m^{-2}·s^{-1}和 7.66 μmol·m^{-2}·s^{-1},KOP_{73}比 KOP_{43}叶片 P_n降低了 4.95 μmol·m^{-2}·s^{-1}。对于同为黄绵土生长的 KOP_{10}、KOP_{43}和 KOP_{73},SWC_{0-400}随生长年限延长逐渐上升,分别为 8.50%、9.06%和 10.71%。土壤水分恢复使 KOP_{43}叶片气孔及非气孔限制值比 KOP_{10}柠条降低了 0.185和 2.180。此外,柠条叶片相对叶绿素含量(SPAD)与 P_n呈极显著正相关($P<0.001$),相关系数为 0.514。研究结果表明衰败期苜蓿和中老龄期柠条叶片光合性能呈波动式变化,这与土壤水分的相互作用有关。

关键词:生长年限;光合特征;土壤水分;衰败期苜蓿;中老龄柠条;黄土高原

中图分类号:S152.7;Q945　　**文献标志码**:A

Effects of growing age on photosynthetic characteristics and soil moisture for *Medicago sativa* and *Caragana korshinkii*

YAO Yu-fei[1,4], SHAO Ming-an[1,2], JIA Yu-hua[3], LI Tong-chuan[2]

(1. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau*, *Institute of Soil and Water Conservation*, *Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
2. *Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling*, *Institute of Geographical Sciences and Natural Research*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101, *China*;
3. *College of Water Resource*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang*, *Liaoning* 110866, *China*;
4. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In order to explore the effect of growing age of *Medicago sativa* and *Caragana korshinkii* on leaf photosynthetic characteristics and soil moisture, we studied the dynamics of leaf photosynthetic parameters, leaf traits and soil volume-tric water content at the 0~400 cm soil depth (SWC_{0-400}) of *Medicago sativa* in degraded period (ALF_{10}, ALF_{13}, ALF_{33}, and ALF_{49}) and *Caragana korshinkii* in middle- and old-aged period (KOP_{10}, KOP_{25}, KOP_{43}, and KOP_{73}). This study was conducted in 2014 at the Liudaogou catchment located in the severe erosion center of wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau of China. The results showed that leaf

收稿日期:2018-04-13　　**修回日期**:2019-01-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41390463,41530854 和 41571221)
作者简介:姚毓菲(1991-),女,陕西西安人,博士研究生,研究方向为土壤物理与农业生态。E-mail: sophielife5@163.com
通信作者:邵明安(1956-),男,湖南常德人,博士,研究员,主要从事土壤物理与农业生态研究。E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

photosyntheticrate (P_n) was not significantly different between ALF_{10} and ALF_{13} ($P>0.05$), and gradually decreased with growing age (ALF_{33} and ALF_{49}). Compared with ALF_{13}, P_n of ALF_{33} and ALF_{49} decreased 2.32 μmol · m^{-2} · s^{-1} and 7.76 μmol · m^{-2} · s^{-1}, respectively. Compared with ALF_{10}, SWC_{0-400} increased to 10.88% (ALF_{13}) and then decreased to 8.81% (ALF_{33}) and 6.12% (ALF_{49}). The limitation of soil moisture on ALF_{33} was not significant, but water stress increased 0.340 of the non-stomatal limitation of photosynthesis for ALF_{49}. As to *C. korshinskii*, P_n increased first and then decreased with increasing growing age. P_n of KOP_{25} and KOP_{43} was not significantly different ($P>0.05$), and they were 6.57 and 7.66 μmol · m^{-2} · s^{-1}, respectively, greater than KOP_{10}. Compared with KOP_{43}, P_n of KOP_{73} decreased 4.95 μmol · m^{-2} · s^{-1}. SWC_{0-400} increased with growing age for KOP_{10} (8.50%), KOP_{43} (9.06%), and KOP_{73} (10.71%), which all grew in Loessial soil. The recovery of soil moisture decreased 0.185 the stomatal and 2.180 non-stomatal limitations for KOP_{43}. Moreover, there was significant correlation between relative chlorophyll content and P_n for *C. korshinskii* ($P<0.001$, $r=0.514$). Collectively, results from our study indicated that leaf photosynthetic parameters fluctuated with increasing age for *M. sativa* in degraded period and *C. korshinskii* in middle- and old-aged period, which was related to changes in soil moisture.

Keywords: growing age; photosynthetic characteristic; soil moisture; *Medicago sativa* in degraded period; *Caragana korshinkii* in middle- and old-aged period; the Loess Plateau

黄土高原水蚀风蚀交错带水土流失严重,生态环境脆弱。长期以来,植树种草作为治理水土流失和改善生态环境的主要措施,在该区域综合治理中发挥了重要作用[1]。苜蓿和柠条具有生态适应性强、根系发达以及保水固土效果显著的特点,又是优质的饲料来源,是黄土高原地区人工植被建设的主要草本和灌木种类[2]。由于苜蓿与柠条属于多年生深根系植物,其持续生长对土壤水分消耗十分强烈,土壤干燥化现象普遍发生,出现了人工植被逐渐退化的现象[3]。因此在人工植被建设中,必须考虑植物持续生长与土壤水分消耗的关系。

光合作用是植物生长发育的基础,植物叶片光合性能的强弱反映了植物的生长情况。不断增加的生长年限及过度消耗的土壤水分对植物生长的限制在光合作用方面表现的尤其明显。对于不同生长年限苜蓿光合性能的研究表明,6 a 苜蓿的净光合速率最高,其次较高的是 12、14、8 a 和 26 a 苜蓿,18 a 最低[4,5]。在黄土高原半干旱区苜蓿生长到 10 a 土壤含水量降到最低,其适宜生长年限应为 8~10 a[6],也有研究显示第 6 年后苜蓿进入衰败期[7]。对于处于衰败期的苜蓿,随着生长年限的延长其叶片光合性能及土壤水分如何变化鲜有报道。人工柠条林的生长分为幼龄期(0~6 a)、中龄期(7~14 a)和老龄期(14 a 以后)[8]。鲍婧婷等[9]研究发现幼龄和中龄期柠条的光合能力高于老龄期,并且中龄期和老龄期柠条应对干旱的策略不同。柠条的持续生长消耗土壤水分,导致土壤干化,有研究报道幼龄期柠条地土壤 0~8 m 土层中未形成土壤干层,中龄期土壤干层厚度约 2.5 m,老龄期土壤干层厚度达到 7 m[10],对于中老龄期柠条,其叶片光合性能等生理特征与土壤水分的关系有待探索。

本文以黄土高原半干旱区生长年限分别为 10、13、33 a 和 49 a 的苜蓿(*Medicago sativa*)以及 10、25、43 a 和 73 a 的柠条(*Caragana korshinskii*)为研究对象,研究处于衰败期的苜蓿和中老龄期的柠条,其生长年限对植物叶片光合特征和土壤水分的影响,探讨随生长年限延长植物生长与土壤水分消耗之间的相互作用关系,以期为这两种植物在黄土高原地区的合理种植和可持续经营提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究在中国科学院水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站六道沟小流域进行。六道沟小流域位于 110°21′~110°23′E,38°46′~38°51′N,地处黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心,海拔 1 094.0~1 273.9 m,面积 6.89 km^2。该流域属于中温带半干旱气候,平均干燥度为 1.8,年平均蒸发量 785.4 mm,年均降水量 437.4 mm,其中 6~9 月降雨量占全年的 77.4%,年均气温 8.4℃。该流域主要土壤类型有绵砂土、黄绵土、红土、风沙土以及坝地淤土等。流域位于森林草原向干旱草原过渡带,其植被类型属于灌丛草原类型。随着国家退耕还林还草工程的推进和区域经济的发展,坡耕地逐步转变为林草地,特别是苜蓿草地、柠条灌木林地和果园杏树林地面积显著增加。

1.2　样地设置

2014 年 7 月在研究区内选择地理条件基本一

致的不同生长年限的苜蓿和柠条样地各 4 块,分别是 10、13、33 a 和 49 a 苜蓿(ALF_{10}、ALF_{13}、ALF_{33}和 ALF_{49})样地和 10、25、43 a 和 73 a 柠条(KOP_{10}、KOP_{25}、KOP_{43}和 KOP_{73})样地。ALF_{10}和 KOP_{10}是课题组人员种植,更长时间生长年限的苜蓿和柠条是根据课题组调查资料同时走访多名当地村民确定。其中最远两个样地相距约 850 m。每个样地按照“S”形选择 5 个样株植物,每个样株选取朝向一致、直径最大的 5 个分株测其地径(距离地面约 1 cm 处)和株高。样地基本情况及植物生长情况见表 1。

表 1 研究样点基本情况

Table 1 The basic information of the study site

样地 Plot	植被 Vegetation	年限/a Age	地理位置 Geographic coordinate	海拔/m Altitude	土壤类型 Soil type	株高/m Height	地径/cm Base diameter
ALF_{10}		10	38°47.663′N, 110°21.716′E	1186		0.84±0.13	3.19±0.83
ALF_{13}	苜蓿	13	38°47.247′N, 110°21.946′E	1250		0.72±0.02	2.85±0.28
ALF_{33}	*M. sativa*	33	38°47.337′N, 110°21.923′E	1237		0.61±3.44	2.56±0.23
ALF_{49}		49	38°47.513′N, 110°21.843′E	1225	黄绵土 Loessial	0.52±0.29	2.74±0.25
KOP_{10}		10	38°47.651′N, 110°21.744′E	1186		1.47±0.13	8.51±1.18
KOP_{43}	柠条	43	38°47.262′N, 110°21.994′E	1250		1.73±0.09	16.34±1.49
KOP_{73}	*C. korshinskii*	73	38°47.349′N, 110°21.942′E	1222		1.44±0.25	13.85±1.73
KOP_{25}		25	38°47.414′N, 110°21.910′E	1215	风沙土 Aeolian	2.01±0.23	16.07±1.48

1.3 观测指标和方法

数据采集在 2014 年 7 月底至 8 月初进行,测定指标及方法如下:

光合气体交换参数:使用 CI-340 型便携式光合测定系统在晴天 9∶00-11∶30 选取植物向阳枝条中上部健康叶片测定,每个样地选择 5 株样株,每个样株测定 5 片叶片,每个叶片测定 2 次。光强设定为 1 000 μmol·m^{-2}·s^{-1},CO_2浓度约为 400 μmol·mol^{-1}。测定的光合特征参数为净光合速率(P_n,μmol·m^{-2}·s^{-1})、蒸腾速率(T_r,mmol·m^{-2}·s^{-1})、气孔导度(G_s,mmol·m^{-2}·s^{-1})、胞间 CO_2浓度(C_i,μmol·mol^{-1})和大气 CO_2浓度(C_a,μmol·mol^{-1})等。水分利用效率(WUE,μmol·$mmol^{-1}$)计算公式为:$WUE=P_n/T_r$;叶片气孔限制值(L_s)计算公式为:$L_s=1-C_i/C_a$;非气孔限制值用 C_i/G_s表示。

相对叶绿素含量($SPAD$):使用便携式叶绿素仪 SPAD-502 测定叶片的 $SPAD$ 值,测定时选取的叶片与测定光合特征值时的一致,每个叶片测定 2 次。

叶片比叶质量(LMA,g·m^{-2}):对于每个样株,叶样采集时选择健康的成熟叶片,随机组成 3 个混合样,每个混合样 50 片叶片。使用扫描仪扫描叶片,利用 Image J 软件算出扫描的叶片面积,然后将叶片装入信封,在 75℃条件下烘干 48 h 至恒重,用精度为 1/10 000 g 的电子天平称量,比叶质量为叶片干质量与叶片面积之比。

土壤体积含水量(SWC,%):在每个样地均匀埋设 3 根中子管,使用 CNC503A(DR)型智能中子水分仪测定 0~400 cm 土层土壤水分,测定期间没有降雨。

1.4 数据分析

采用 EXCEL 2013 和 SPSS 16.0 软件对数据进行处理,Origin Pro 9.0 软件作图。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和多重比较(Duncan)对不同数据组间进行差异显著性比较($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生长年限对苜蓿和柠条叶片光合特征和叶结构性状的影响

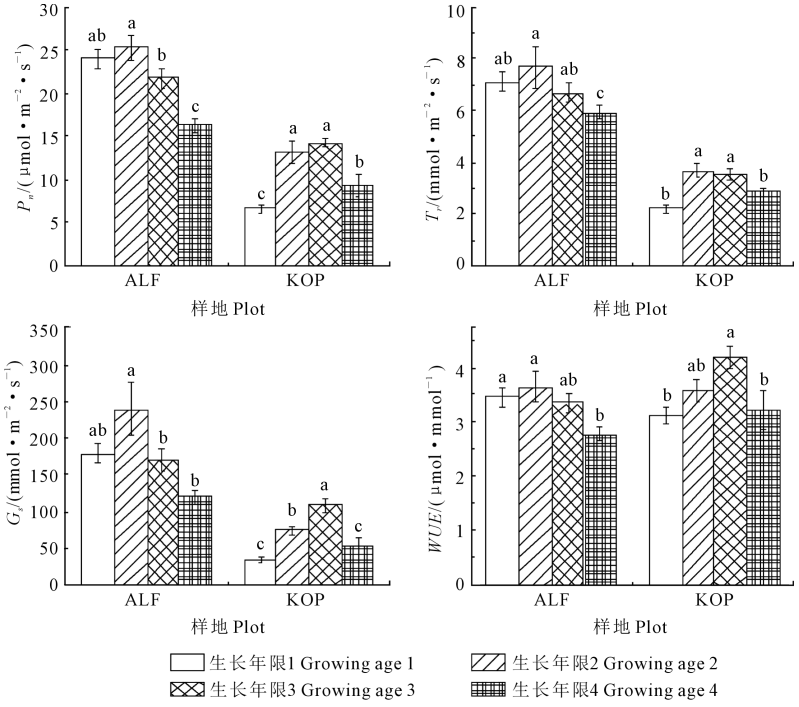
2.1.1 苜蓿和柠条叶片 P_n,T_r,G_s和 WUE 由图 1 可知,不同生长年限苜蓿叶片光合参数 P_n和 G_s均表现为 ALF_{10}和 ALF_{13}差异不大($P>0.05$),而后随着生长年限的延长(ALF_{33}和 ALF_{49})而显著降低($P<0.05$)。生长年限为 10、13、33 a 和 49 a 苜蓿叶片 P_n分别为 24.01、25.27、21.72 μmol·m^{-2}·s^{-1}和 16.25 μmol·m^{-2}·s^{-1},G_s分别为 179.63、239.31、169.96 mmol·m^{-2}·s^{-1}和 120.67 mmol·m^{-2}·s^{-1}。叶片 T_r表现为 ALF_{10}、ALF_{13}和 ALF_{33}差异不显著($P>0.05$),但是显著高于 ALF_{49}($P<0.05$)。叶片 G_s与 P_n、T_r存在极显著的相关性($P<0.01$),相关系数分别为 0.711和 0.738。ALF_{49}的 P_n、T_r和 G_s显著低于 ALF_{33}($P<0.05$),但是 WUE 相差不显著($P>0.05$),说明随着生长年限的延长,苜蓿叶片光合速率虽然显著减弱但是叶片的水分利用效率差异不大。

对于柠条叶片,光合参数 P_n、T_r、G_s和 WUE 总体呈现出随生长年限的延长先升高后降低的趋势。具体来说,叶片 P_n和 T_r表现为 KOP_{25}和 KOP_{43}差异不显著($P>0.05$),显著高于 KOP_{73},而 KOP_{10}最低。例如 10、25、43 a 和 73 a 柠条叶片 P_n分别为 6.62、13.19、14.28 μmol·m^{-2}·s^{-1}和 9.33 μmol·m^{-2}·

s^{-1}。对于 G_s 和 *WUE*,表现为 KOP_{43} 最大,而 KOP_{10} 和 KOP_{73} 最小且差异不显著($P>0.05$)。叶片 G_s 与 P_n、T_r 存在极显著的相关性($P<0.01$),相关系数分别为 0.861 和 0.785。对于中老龄期柠条,叶片的光合性能随着柠条的生长年限延长而增强(KOP_{25} 和 KOP_{43}),但柠条持续生长到一定时间后(KOP_{73}),其光合性能有所下降。

2.1.2　苜蓿和柠条叶片 *SPAD* 值和比叶质量(*LMA*)　由图 2 可知,苜蓿叶片 *SPAD* 值在不同年限间差异不显著($P>0.05$),均值为 57.65;苜蓿叶片 *LMA* 差异不显著($P>0.05$),均值为 82.72 g·m^{-2}。不同生长年限柠条叶片 *SPAD* 值表现为中龄期柠条 KOP_{10}(60.21)显著低于老龄期柠条 KOP_{25}(63.98)和 KOP_{43}(65.75),但是和老龄期柠条 KOP_{73}(63.41)差异不显著。这与 P_n 的规律一致,柠条叶片 *SPAD* 与 P_n 呈极显著正相关($P<0.001$),相关系数为 0.514。不同生长年限柠条叶片 *LMA* 差异不显著($P>0.05$),均值为 77.83 g·m^{-2}。

2.1.3　苜蓿和柠条叶片 L_s 和 C_i/G_s　表 2 展示了不同生长年限苜蓿和柠条叶片的气孔限制值 L_s 和非气



注:生长年限 1、2、3、4 的苜蓿和柠条分别为 ALF_{10}、ALF_{13}、ALF_{33}、ALF_{49} 和 KOP_{10}、KOP_{25}、KOP_{43}、KOP_{73};同种植物不同小写字母表示不同生长年限间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Growing ages 1, 2, 3 and 4 of *Medicago sativa* and *Caragana korshinskii* were ALF_{10}, ALF_{13}, ALF_{33}, ALF_{49}, and KOP_{10}, KOP_{25}, KOP_{43}, KOP_{73}, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among growing ages for the same species. The same as below.

图 1　不同生长年限苜蓿(ALF)和柠条(KOP)叶片 P_n,T_r,G_s 和 *WUE* 比较

Fig.1　Leaf P_n, T_r, G_s, and *WUE* of *Medicago sativa* (ALF) and *Caragana korshinskii* (KOP) at different growing ages

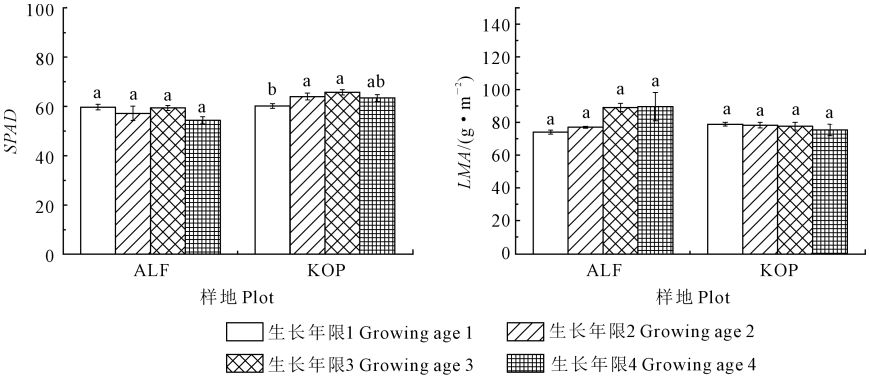


图 2　不同生长年限苜蓿(ALF)和柠条(KOP)叶片 *SPAD* 和 *LMA* 比较

Fig.2　Leaf *SPAD* and *LMA* of *Medicago sativa* (ALF) and *Caragana korshinskii* (KOP) at different growing ages

孔限制值 C_i/G_s。不同生长年限苜蓿叶片 L_s 没有显著差异($P>0.05$),均值为 0.499;但是 ALF_{49} 的 C_i/G_s(1.789)显著高于 ALF_{10}(1.304)、ALF_{13}(1.207)和 ALF_{33}(1.449)。不同生长年限柠条叶片的 L_s 和 C_i/G_s 均表现先降低后升高的趋势,KOP_{10} 最大(4.618),随生长年限的延长不断降低,KOP_{43} 最小(2.438),而后 KOP_{73}(4.014)有所上升。

2.2 生长年限对苜蓿和柠条土壤水分的影响

2.2.1 土壤体积含水量的剖面变化特征 图 3 为不同生长年限苜蓿草地及柠条林地 0~400 cm 土层土壤体积含水量的垂直分布图。对于不同生长年限的苜蓿草地,由于受到降水的影响,0~100 cm 土层土壤总体上均保持着较高的含水量,并随土层深度增加迅速降低。对于 0~400 cm 土层,土壤剖面平均含水量表现为 ALF_{13}(10.88%)最高,ALF_{10}(8.86%)和 ALF_{33}(8.81%)居中且差异不显著($P>0.05$),ALF_{49}(6.12%)最低,表明随着苜蓿生长年限的增加,土壤水分经历了恢复又降低的过程。ALF_{10}、ALF_{13} 和 ALF_{33} 在 100~400 cm 间各深度土壤含水量差异不显著($P>0.05$),并且土壤含水量随土层深度的增加变化较小,垂直分布均一,说明在本试验中处于衰败期的苜蓿在 10~33 a 间根系对 100~400 cm 土层土壤水分的消耗程度相似。在 250~300 cm 土层,ALF_{49} 相较于其它 3 个生长年限土壤含水量变化幅度更大。ALF_{49} 在 250~300 cm 土层土壤水分逐渐增大,在 300~400 cm 土层土壤含水量(6.90%)与 0~100 cm(8.26%)差异不显著($P>0.05$),表明 ALF_{49} 在该土层土壤水分有所恢复,可能是根系对该层水分消耗降低所致。

由于 KOP_{25} 土壤类型为风沙土,浅层土壤受蒸发影响强烈,0~100 cm 土层土壤含水量显著低于其它 3 个年份的柠条林。对于土壤类型均为黄绵土的 KOP_{10}、KOP_{43} 和 KOP_{73},土壤含水量在 0~100 cm 土层迅速下降,对于 0~400 cm 土层,平均土壤含水量表现为 KOP_{10}(8.50%) < KOP_{43}(9.06%) < KOP_{73}(10.71%)(图 3),表明老龄期柠条林地 0~400 cm 土层土壤水分比中龄期有所提高。KOP_{10} 在 100~400 cm 土层土壤含水量呈现出稳中上升的规律,KOP_{43} 和 KOP_{73} 在 100~250 cm 土层土壤水分逐渐增加,在 250 cm 左右土壤水分降低,而后呈现稳中上升的规律。在 100~250 cm 土层,平均土壤含水量表现为 KOP_{43}(6.97%)>KOP_{10}(6.11%),在 250~400 cm 土层,土壤平均含水量表现为 KOP_{10}(7.86%)>KOP_{43}(6.75%)。

2.2.2 生长年限对不同土层土壤水分的影响 表 3 为生长年限对苜蓿和柠条地不同土层土壤水分影响的方差分析结果。由于柠条 25 a 样地为风沙土地,在此我们分析 10、13、33 a 和 49 a 的苜蓿草地和 10、43 a 和 73 a 的柠条林地。不同生长年限苜蓿地 100~400 cm 土层土壤含水量差异达到极显著水平($P<0.01$),其中 100~200 cm 差异最大,F 值达到 150.703。

表 2 不同生长年限苜蓿和柠条的气孔限制值和非气孔限制值

Table 2 Stomatal and non-stomatal limitations of *Medicago sativa* and *Caragana korshinskii* at different growing ages

变量 Variable	苜蓿 *M. sativa*				柠条 *C. korshinskii*			
	10 a	13 a	33 a	49 a	10 a	25 a	43 a	73 a
L_s	0.513a	0.467a	0.492a	0.523a	0.662a	0.578b	0.477c	0.619ab
C_i/G_s	1.304b	1.207b	1.449b	1.789a	4.618a	3.011bc	2.438c	4.014ab

注:同种植物不同小写字母表示不同生长年限间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among growing ages for the same species.

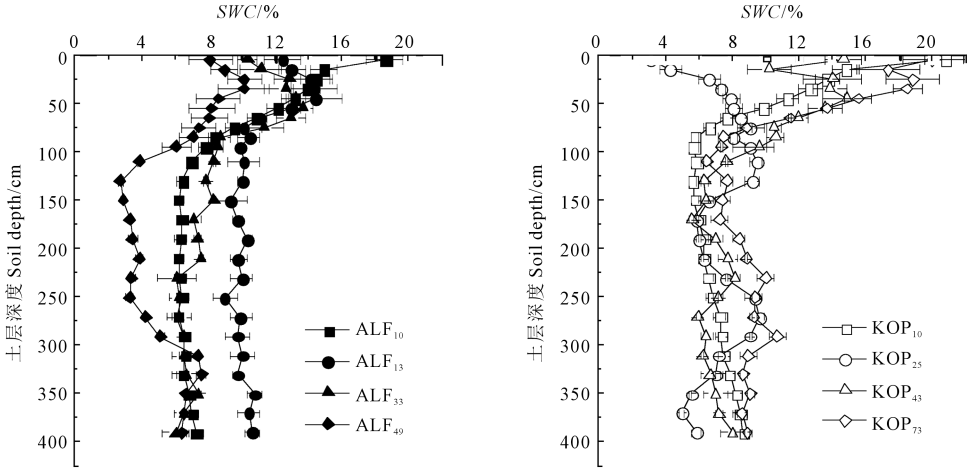


图 3 不同生长年限苜蓿(ALF)和柠条地(KOP)0~400 cm 土层土壤含水量(SWC)剖面分布

Fig.3 Soil water content of *Medicago sativa* (ALF) and *Caragana korshinskii* (KOP) in the 0~400 cm soil depth at different growing ages

表 3　不同生长年限苜蓿和柠条地 0~400 cm 土层土壤含水量的方差分析

Table 3　ANOVA analysis of soil moisture at the 0~400 cm soil depth among different growing ages in *Medicago sativa* and *Caragana korshinskii* land

土层深度/cm Soil depth	苜蓿 *M. sativa*			柠条 *C. korshinskii*		
	df	*F*	*P*	df	*F*	*P*
0~100	3	5.604	0.023	2	3.613	0.093
100~200	3	150.703	<0.001	2	6.203	0.035
200~300	3	32.587	<0.001	2	22.302	0.002
300~400	3	22.315	<0.001	2	5.506	0.044
0~400	3	32.657	<0.001	2	8.421	0.007

在 100~400 cm 土层,生长年限对苜蓿草地土壤含水量的影响随深度增加逐渐降低,可能因为随着土壤深度增加苜蓿根系生物量呈指数函数递减规律[11]。生长年限对 0~400 cm 土层柠条地土壤水分的影响弱于苜蓿地,100~400 cm 土层土壤水分的差异性达到显著水平($P<0.05$),其中 200~300 cm 土层土壤含水量差异最大,F 值达到 22.302。

3　讨　论

3.1　衰败期苜蓿生长与土壤水分消耗过程

苜蓿持续生长 6~10 a 后进入衰败期[4-5],本试验探究苜蓿进入衰败期后不同生长年限的叶片光合参数表明,ALF_{10} 和 ALF_{13} 叶片 P_n 和 G_s 差异不显著,大于 ALF_{33};ALF_{10}、ALF_{13} 和 ALF_{33} 叶片 T_r 和 *WUE* 差异不显著,ALF_{49} 4 项光合参数均最低(图 1)。金风霞等[12]对 2~6 a 苜蓿叶片光合生理特征进行研究得出,5 a 和 6 a 苜蓿叶片 P_n 和 T_r 最高,表明非衰败期苜蓿随生长年限延长光合性能增加。胡守林等[4]对 6~26 a 苜蓿叶片的光合特征研究结果显示,不同年龄苜蓿叶片 P_n 大小顺序为:6 a>12 a>14 a>8 a>26 a>18 a,即随生长年限延长呈先降低再升高而后又降低再升高的波动式变化。曹永红等[13]研究 3~26 a 苜蓿草地土壤有机质含量发现,4~18 a 苜蓿土壤有机质含量随生长年限延长逐渐降低,18 a 后有机质含量逐渐升高。在本研究中相比 10 a 苜蓿,13 a 苜蓿叶片光合参数尽管有增大的趋势,但差异不显著,说明对于衰败期苜蓿,叶片光合参数随生长年限的延长可能呈现波动式变化,但总体呈逐渐降低的趋势;苜蓿的株高和地径也随着生长年限的延长逐渐降低(表 1),说明苜蓿逐渐衰败。胡守林等[4]认为,生长年限对苜蓿叶片光合速率的影响是因为叶片衰老引起叶绿素含量下降导致,与叶片气孔特征也有关。在本试验中,不同生长年限间叶片 *SPAD* 没有显著差别,可能是因为试验苜蓿均处于衰败期,其叶结构性状特征差别不大,没有显著差异的 *LMA* 也说明了这一点(图 2)。在干旱与半干旱区,土壤水分是制约植物生长的主要限制性因素,生长年限对叶片光合性能的影响可能与土壤水分与植物生长的相互作用有关。

对于不同生长年限苜蓿草地的土壤水分情况,Wang 等[14]研究了 1~4 a 和 31 a 苜蓿,发现随着生长年限的增加土壤水分逐渐降低;程积民等[6]的研究表明,苜蓿生长 4~8 a 间为旺盛生长阶段,第 10 年土壤含水量最低,苜蓿基本衰败,在 15~20 a,0~500 cm 土层土壤水分可恢复到种植前。在本试验中,0~400 cm 土层土壤水分大体呈现随生长年限先增加(ALF_{13})后降低(ALF_{33} 和 ALF_{49})的趋势。说明随着苜蓿年限的增长,对土壤水分消耗呈现“增大—减小—增大”的过程,可见苜蓿生长耗水有一个缓冲期,这可能与不同年限苜蓿生理生长有关,在今后研究中需要深入探讨。受到降雨和蒸发的影响,植物对 0~100 cm 土层土壤水分的影响弱于深层土壤(100~400 cm)(表 3),但是我们发现49 a 苜蓿 0~100 cm 土层土壤含水量显著低于其他年份。曹永红等[13]报道 3~26 a 苜蓿 0~100 cm 土层含水量随生长年限的延长而降低;She 等[15]报道了 4、7、10、15 a 和 32 a 苜蓿 0~120 cm 土层土壤储水量,发现 32 a 苜蓿显著低于其他年份,这些研究与我们的结果一致。在本试验中,土壤水分的变化趋势与叶片光合参数的变化趋势相似,说明土壤水分随苜蓿生长年限的变化同样也影响到苜蓿的生长情况,正如孙东宝等[16]的研究表明,土壤含水量与苜蓿叶片光合性能呈正相关。

L_s 和 C_i/G_s 分别反映了水分胁迫下由气孔导度降低引起的气孔限制和叶肉细胞光合能力下降引起的非气孔限制。叶片的非气孔限制与叶绿体活性、Rubisco 活性和 RuBP 再生能力有关[17]。相比 ALF_{13},ALF_{33} 的 0~400 cm 土层土壤含水量显著降低(图 3),L_s 和 C_i/G_s 有所降低但差异不显著($P>0.05$)(表 2),说明水分胁迫作用并不明显。相比 ALF_{33} 和 ALF_{49} 的 0~400 cm 土层土壤含水量显著降低,L_s 差异不显著但是 C_i/G_s 显著增大,说明 ALF_{49} 形成水分胁迫产生非气孔限制从而降低叶片光合性能。由于本试验中只选取了 4 个生长年限的苜蓿,土壤水分及叶片光合特征需要进一步研究。

3.2　中老龄期柠条生长与土壤水分消耗过程

对于不同生长年限柠条叶片光合生理特征的研究结果表明,相比中龄期柠条(KOP_{10}),老龄期柠条叶片光合参数 P_n,T_r,G_s 和 *WUE* 及叶结构性状参数 *SPAD* 存在随生长年限延长先增大(KOP_{25} 和 KOP_{43})后减小(KOP_{73})的变化趋势。叶绿素是光合作用中叶片将光能转变为化学能的关键物质,叶片

光合特征的变化与叶绿素含量有关,本研究中叶片 *SPAD* 与 P_n 呈显著正相关($r=0.514$,$P<0.001$)。

梁海斌等[18]报道黄土区不同林龄柠条林 0~600 cm 土层中土壤水分 10 a>20 a>35 a,表明柠条的持续生长不断消耗土壤水分。在本试验中黄绵土 0~400 cm 土层土壤含水量由大至小为:KOP_{73}>KOP_{43}>KOP_{10},这说明对于成熟柠条林生长至某一时间后 0~400 cm 土层土壤水分有所恢复。程积民等[10]报道老龄期柠条地上部分的生长主要利用深度超过 1000 cm 的发达的主根吸收深层土壤水分,浅中层土壤水分有所恢复。相比中龄期柠条(KOP_{10}),根系下扎吸收深层水分是老龄期柠条(KOP_{43}和 KOP_{73})0~400 cm 土层水分恢复的主要原因。此外,对于 KOP_{73},其较差的生长情况(光合参数、株高和基径最低)可能导致水分消耗低于 KOP_{43},土壤水分增大。Jia 等[19]的研究表明种植刺槐 25 a 内,0~400 cm 土层土壤含水量随刺槐的生长不断降低,但是大于 25 a 后,因为刺槐密度的降低土壤水分逐渐恢复。

相比 KOP_{10},KOP_{43}的 0~400 cm 土层土壤含水量升高(图 3),叶片光合性能提升(图 1),L_s 和 C_i/G_s 均显著降低(表 2),说明土壤水分的增加使叶片气孔限制和非气孔限制减小,叶片光合性能提升,植物长势更好(表 1)。KOP_{43}和 KOP_{73}的 L_s 和 C_i/G_s 均显著增大;非气孔限制值 C_i/G_s 增大,这可能是因为叶绿体活性、Rubisco 活性和 RuBP 再生能力降低,叶片衰老导致光合性能降低。另外,本试验中 KOP_{25}样地土壤类型为风沙土,其它柠条地土壤类型为黄绵土。可以看到,KOP_{25} 土壤含水量低于 KOP_{10}和 KOP_{43},而 KOP_{25}叶片 P_n、T_r与 KOP_{43}差异不显著但是大于 KOP_{10},这可能与不同质地土壤水分有效性相关,对于土壤质地及植物生长年限对植物光合性能和土壤水分的影响有待进一步探索。

4 结 论

1)对于衰败期苜蓿,10 a 和 13 a 苜蓿叶片光合参数 P_n、T_r、G_s 和 *WUE* 差异不显著,而后随着生长年限的延长逐渐降低(33 a 和 49 a);4 个生长年限苜蓿叶结构性状 *SPAD* 和 *LMA* 差异不显著。相比 10 a 苜蓿,0~400 cm 土层土壤含水量随生长年限的延长先升高(13 a)后降低(33 a 和 49 a)。土壤水分对 33 a 苜蓿叶片光合的限制作用不明显,但是水分胁迫使 49 a 苜蓿叶片非气孔限制增大,导致光合性能降低。

2)相比中龄期柠条(10 a),老龄期柠条叶片光合参数 P_n、T_r、G_s 和 *WUE* 和叶结构性状 *SPAD* 随生长年限延长先增加(25 a,43 a)后降低(73 a),叶片光合参数 P_n 与 *SPAD* 显著正相关。对于同样生长在黄绵土上的柠条(10 a、43 a 和 73 a),0~400 cm 土层土壤含水量随生长年限的延长逐渐升高。土壤水分恢复使 43 a 柠条叶片气孔及非气孔限制降低,叶片光合性能提升;73 a 柠条叶片气孔及非气孔限制增大,叶片衰老,光合性能降低。

参 考 文 献:

[1] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China[J]. Plos One,2012,7(2):e31782.

[2] 张素霞,吕家珑,杨瑜琪,等.黄土高原不同植被坡地土壤无机磷形态分布研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):29-32.

[3] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China[J]. Geoderma,2010,159(1-2):99-108.

[4] 胡守林,万素梅,贾志宽,等.黄土高原半湿润区不同生长年限苜蓿叶片光合性能研究[J].草业学报,2008,17(5):60-67.

[5] 万素梅,贾志宽,郑建明.黄土高原地区不同生长年限苜蓿光合作用的日变化规律研究[J].自然资源学报,2009,24(6):992-1003.

[6] 程积民,程杰,高阳.半干旱区退耕地紫花苜蓿生长特性与土壤水分生态效应[J].草地学报,2011,19(4):565-569,576.

[7] 任晶晶,李军,王学春,等.宁南半干旱与半干旱偏旱区苜蓿草地土壤水分与养分特征[J].生态学报,2011,31(13):3638-3649.

[8] 王志强,刘宝元,张岩.不同植被类型对厚层黄土剖面水分含量的影响[J].地理学报,2008,63(7):703-713.

[9] 鲍婧婷,王进,苏洁琼.不同林龄柠条(*Caragana korshinskii*)的光合特征和水分利用特征[J].中国沙漠,2016,36(1):199-205.

[10] 程积民,万惠娥,王静,等.半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J].林业科学,2005,41(2):37-41.

[11] 李扬,孙洪仁,沈月,等.紫花苜蓿根系生物量垂直分布规律[J].草地学报,2012,20(5):793-799.

[12] 金凤霞,麻冬梅,武东波,等.不同种植年限苜蓿叶片光合生理生态特性的研究[J].北方园艺,2013,22:70-73.

[13] 曹永红,贾志宽,韩清芳.苜蓿生长年限对其产量及土壤性状的影响[J].干旱地区农业研究,2008,24(3):104-108.

[14] Wang Y Q, Shao, M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology,2010,381(1-2):9-17.

[15] She D L, Shao M A, Timm L C, et al. Temporal changes of an alfalfa succession and related soil physical properties on the Loess Plateau, China[J]. Pesquisa Agropecuaria Brasileira,2009,44(2):189-196.

[16] 孙东宝,王庆锁.水分对苜蓿叶片光合特性的影响[J].植物生态学报,2012,36(1):72-80.

[17] 杨泽粟,张强,郝小翠.自然条件下半干旱雨养春小麦生育后期旗叶光合的气孔和非气孔限制[J].中国农业生态学报,2015,23(2):175-182.

[18] 梁海斌,史建伟,牛俊杰,等.晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条地土壤水分变化特征研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(6):143-148.

[19] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2017,546:113-122.